第48卷 第1期
2025年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 48 No. 1
Jan. 2025

黄河流域城市生态韧性、社会网络及其影响因素分析

张傲翔[1]， 苗成林[1,2]， 陈峥妍[2]

（1. 安徽理工大学经济与管理学院，安徽 淮南 232001；2. 山东工商学院工商管理学院，山东 烟台 264005）

摘 要：分析城市生态韧性的社会网络以及影响因素有助于促进区域绿色协同发展。选取黄河流域63个地级市2012—2021年相关数据，构建压力-状态-反应模型。采用CRITIC-TOPSIS、引力模型、多尺度地理加权回归模型分析黄河流域城市生态韧性、联动关系以及影响因素。结果表明：（1）黄河流域生态韧性总体在0.5左右波动，表现为“上游>下游>中游”，各流域年平均涨幅分别为0.41%、0.30%、0.40%。（2）黄河流域大致可分为7个主要城市网络（N_1~N_7），上、中、下游的流域聚集程度和城市关联程度依次不断升高。（3）考虑直接作用、调节作用以及替代效应的影响，产业结构高级化对城市网络N_1~N_4的城市生态韧性提升作用更大，影响系数分别为0.4213、0.4210、0.5085、0.8883，而产业结构合理化更有利于提升城市网络N_5~N_7的城市生态韧性，影响系数分别为0.8483、0.5669、0.8128。

关 键 词：生态韧性；空间结构；CRITIC-TOPSIS；多尺度地理加权回归；黄河流域

文章编号：1000－6060(2025)01－0130－13(0130～0142)

“十四五”规划和2035年远景目标纲要提出韧性城市建设，生态韧性作为韧性城市多维空间建设的重要组成部分[1]，被用于描述城市生存、适应和发展能力[2]。随着我国城市化的快速推进，城市生态问题日益严峻，区域协同治理成效不明显[3]。城市遭受自然灾害的胁迫事件频繁发生，城市生态安全和脆弱性受到广泛关注。如何提高城市抵御灾害冲击并快速恢复城市功能的能力成为城市生态韧性的主要研究内容之一。

黄河流域生态保护和高质量发展是国家重大战略[4]。作为中国重要的生态屏障以及人口活动和经济发展的重要区域，在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位[5-6]。加强生态保护治理，构建具有较强生态韧性的城市生态环境，对全流域高质量发展，改善流域人居环境具有重要意义。但由于经济发展粗放，资源开发利用程度较低，整体性、系统性生态问题突出[7]，恢复难度大且过程缓慢。依据《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》，在统筹解决流域生态问题时，应综合考虑流域内城市之间的发展关系，因此分析黄河流域城市生态韧性水平、社会网络结构及其影响因素对于提升黄河流域城市生态韧性，促进黄河流域高质量发展具有重要现实意义。

对于生态韧性的研究，一方面主要针对生态韧性概念、特征以及发展机理进行研究。韧性表示系统或个体经历冲击或扰动后能够恢复回弹的能力[8]。1973年Holling[9]将韧性引入生态学领域，认为生态韧性是在自然和人为因素作用下的自然系统在面对变化时所能承受或吸收的扰动程度。Zeng等[10]指出相对于“静态”的工程韧性，“动态”的生态韧性更强调系统受到干扰时保留关键作用的能力。Folke等[11]提出生态韧性应具有抵抗力、恢复力、适应能力和转变能力。Esteve等[12]总结生态韧性的3个基本特征，包括保持原有状态时可承受的冲击、自组织以及学习和适应能力，并提出系统的适应能力若能够在受到冲击或发生变化后从先前的输入行

收稿日期：2024-02-20； **修订日期**：2024-04-11

基金项目：国家自然科学基金面上项目（72173073，51774013，71503003）；2021年度烟台市校地融合发展项目（2021XDRHXMXK06）；安徽理工大学2023年研究生创新基金项目（2023CX2168）资助

作者简介：张傲翔（1998-），男，硕士研究生，主要从事技术创新与管理研究. E-mail: aoxiangzhg@163.com

通讯作者：苗成林（1980-），男，博士，教授，主要从事绿色低碳发展、创新管理与政策研究. E-mail: chlmiaostbu@163.com

动中学习，并调整所产生的反馈输出，那么反馈回路就能发挥巨大作用。另一方面，主要对生态韧性进行水平测度和影响因素分析。对于生态韧性的测算大多采用综合指标法，基于“抵抗-适应-恢复”以及“压力-状态-反应”（PSR）角度构建指标体系[13-16]，通过熵权法、变异系数法、CRITIC方法进行赋权并计算结果。陶洁怡等[13]通过抵抗-适应-恢复视角构建评价指标体系，从城市群角度分析生态韧性的集聚特征和影响因素。张明斗等[14]通过构建空间杜宾模型探讨环境规制对生态韧性的直接效应以及技术创新的中介效应，并分析影响因素的空间溢出效应。周成等[15]基于抵抗力-恢复力维度构建指标体系，采用熵值加权求和法测算黄河流域57个城市生态韧性，并分析与生态效率的协同发展关系。周文慧等[16]通过测量生态环境水平，并分析与数字基础设施、经济发展韧性三者之间的耦合关系以及协同发展现状和趋势。

综上，对于城市生态韧性的研究侧重于城市个体韧性评价和提升路径，但生态韧性不仅体现在城市个体抵御灾害冲击并恢复的能力，更反映在同一社会网络背景下的城市集群在面对自然灾害和人为冲击时的应变能力。已有研究对于城市生态韧性水平约束下的社会网络结构以及基于网络结构分析影响因素的研究较少。因此，本文在采用CRITIC-TOPSIS测算黄河流域城市生态韧性水平的基础上，通过修正引力模型计算城市生态韧性联系强度，对其进行二值化处理构建社会网络，分析城市空间结构，并通过多尺度地理加权回归（MGWR）模型分析城市生态韧性的影响因素。

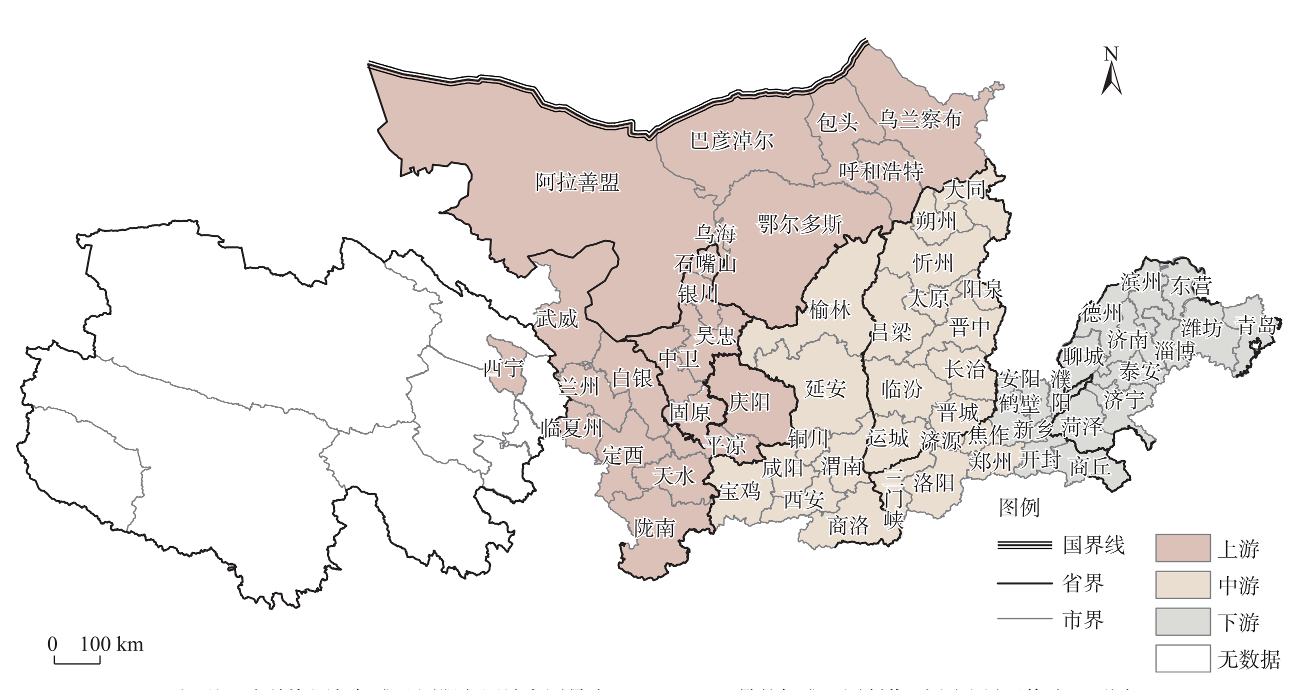
1 数据与方法

1.1 研究区概况

根据2023年4月1日起施行《中华人民共和国黄河保护法》以及水利部黄河水利委员会规定黄河流域范围包括黄河干流、支流和湖泊的集水区域所涉及的青海省、四川省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、山西省、陕西省、河南省、山东省9省区。考虑到数据的可获得性和完整性，本文的研究对象共计63个地级市，未涉及四川省阿坝州以及青海省海东市、海南藏族自治州、海西藏族自治州、海北藏族自治州（图1）。

1.2 指标体系构建及数据来源

考虑到城市生态韧性在面对冲击时主要经过扰动前、扰动中、扰动后3个阶段，分别对应PSR三大过程要素[17]。压力表现为人为活动对环境造成的影响以及自然灾害对环境造成的破坏。状态指的是城市现有的生态建设程度。反应指的是城市

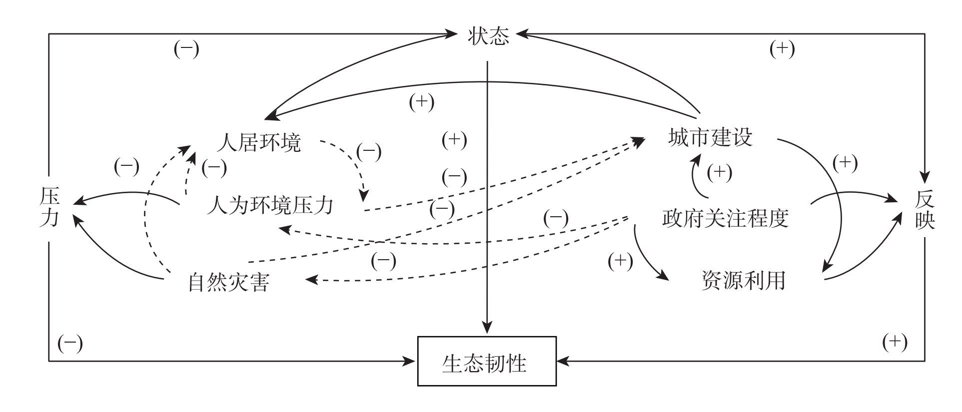


注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作，底图边界无修改。下同

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

管理者在现有基础为改善城市生态环境所付出的努力,包括资源和改善程度。PSR的逻辑作用关系如图2所示。由于各种因素造成的环境破坏,对城市现有状态造成不利影响。但良好的城市设施建设,以及在发展过程中政府对于环境保护的重视程度,在一定程度上能够减弱因人为或自然灾害带来的影响,恢复和改善现有状态,提升城市生态韧性。借鉴王松茂等[5]、牛建广等[18]、Li等[19]的研究,构建黄河流域生态韧性评价指标体系,用以评估研究区城市生态韧性,具体指标体系如表1所示。



注:+表示正反馈促进作用;−表示负反馈抑制作用。

图2 “压力−状态−反应”模型关系

Fig. 2 “Pressure-state-response” model relationship

表1 黄河流域城市生态韧性评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of ecological resilience of cities in the Yellow River Basin

目标层	准则层	指标层	单位	属性	权重
城市生态韧性	压力	SO_2排放量	t	负	0.1198
		工业烟(粉)尘排放量	t	负	0.0844
		自然灾害频率	次·a^{-1}	负	0.0854
	状态	人均公园绿地面积	m^2·人$^{-1}$	正	0.0580
		空气质量优良率	%	正	0.1699
		建成区绿化覆盖率	%	正	0.0759
	反应	节能环保支出占一般财政支出的比重	%	正	0.0825
		污水处理率	%	正	0.0898
		一般工业固体废弃物综合利用率	%	正	0.1662
		城市生活垃圾无害化处理率	%	正	0.0680

数据主要来源于2012—2021年《中国城市统计年鉴》以及省、市《统计年鉴》。环境质量信息来源于各省环境统计公报。自然灾害数据来自全球自然灾害信息库(国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://disaster.casnw.net/#/root/view)。节能环保支出与一般公共财政预算支出来自各省市统计年鉴以及各市财政局公开预算支出报告。部分缺失数据采用样条插值处理,共采集6300个数据。

1.3 研究方法

1.3.1 CRITIC-TOPSIS模型 CRITIC是基于评价指标对比强度和指标冲突性,通过消除相关性较强的指标的影响,减少指标信息重叠衡量指标客观权重[20]。在此基础上,采用TOPSIS计算最终的生态韧性水平。TOPSIS是一种多目标决策方法[21],采用余弦法[22]找出有限方案中的最优方案和最劣方案,从而计算各评价方案之间的差距[23]。通过将二者结合,构建CRITIC-TOPSIS模型:

(1) 无量纲化处理

对于m个待评价样本n个评价指标构成的评价指标进行标准化处理:

$$\begin{cases} x'_{ij} = \dfrac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}, & x_{ij}\text{为正向指标} \\ x'_{ij} = \dfrac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}, & x_{ij}\text{为负向指标} \end{cases} \tag{1}$$

$$(i \in 1, 2, \cdots, m;\ j \in 1, 2, \cdots, n)$$

式中:x_{ij}为第i个城市第j个指标;x'_{ij}为x_{ij}经标准

化处理后的值；x_j 为第j个指标。

（2）指标权重

CRITIC通过标准差表示各指标内取值的差异波动情况，同时采用相关系数计算指标冲突性，通过指标变异性和冲突性计算指标信息量[24]，指标变异性越大，指标之间的相关性越弱，则信息量越大，权重越高。

$$W_j=\frac{C_j}{\sum_{j=1}^{n}C_j}=\frac{S_j\times R_j}{\sum_{j=1}^{n}\left(S_j\times R_j\right)}=\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(x'_{ij}-\bar{x}_j\right)^2}{m-1}}\times\sum_{j=1}^{n}(1-r_{jk})}{\sum_{j=1}^{n}\left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(x'_{ij}-\bar{x}_j\right)^2}{m-1}}\times\sum_{j=1}^{n}(1-r_{jk})\right)} \quad (2)$$

式中：r_{jk} 为指标j与指标k的相关系数，用Pearson系数表示；$\bar{x}_j$ 为第j个指标的平均值；S_j、R_j、C_j 分别为第j个指标变异性、冲突性和信息量；W_j 为第j个指标的权重。

（3）定义理想解

对于指标矩阵，正理想解和负理想解被定义为：

$$\begin{aligned}Z^+&=\left\{\max\left(x'_{11},x'_{21},\cdots,x'_{i1}\right),\cdots,\max\left(x'_{1j},x'_{2j},\cdots,x'_{ij}\right)\right\}\\Z^-&=\left\{\min\left(x'_{11},x'_{21},\cdots,x'_{i1}\right),\cdots,\min\left(x'_{1j},x'_{2j},\cdots,x'_{ij}\right)\right\}\end{aligned} \quad (3)$$

（4）计算生态韧性水平

通过加权欧氏距离计算第i(i=1, 2, ⋯, m)个待评估对象与理想解之间的距离，并通过归一化处理计算第m个待评估对象的得分，即为城市生态韧性水平（S_i）。

$$S_i=\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}W_j\left(x'_{ij}-Z^-\right)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}W_j\left(x'_{ij}-Z^+\right)^2}+\sqrt{\sum_{i=1}^{n}W_j\left(x'_{ij}-Z^-\right)^2}} \quad (4)$$

1.3.2　社会网络分析法　“社会网络”被定义为一群行动者及彼此之间的联系，主要包括“节点”和“联系”2个基本要素。其中，“节点”是社会网络中的行动者，“联系”代表节点之间的实质性联结关系，包括城市之间的距离关系以及贸易关系等[25]。采用社会网络分析方法来构建黄河流域城市生态韧性网络是本文分析的基础，可以直观地呈现黄河流域城市生态韧性的整体格局。

（1）城市生态韧性联系度

引力模型常被用于研究系统间或系统内不同实体之间的空间联系状况[26]。已有学者利用引力模型测算产业经济[27]、能源消费[28]之间的空间联系。借鉴邱志萍等[29]改进的引力模型，本文在计算联系度时将 $e^{-\alpha_i\beta_l d_{il}}$ 作为指数衰减函数，以此测算黄河流域63个城市之间的联系度（G_{il}）：

$$G_{il}=kS_iS_l e^{-\alpha_i\beta_l d_{il}} \quad (5)$$

式中：k为引力常量，通常取值为1；α_i 为第i个城市外部吸收能力，由贸易进口额的自然对数的倒数表示；β_l 为第l个城市的对外输出能力，由贸易出口额的自然对数的倒数表示；d_{il} 为第i个城市和第l个城市的空间地理距离；S_l 为由CRITIC-TOPSIS计算所得到的城市生态韧性。

（2）城市生态韧性网络构建

将63个城市视为网络节点，结合社会网络结构，将城市之间的联系度作为网络结构连边权重，同时联系度均值作为阈值，联系度大于阈值则保持不变，反之则为0。由此得到城际之间的加权有向流动网络矩阵，并对城市联系关系进行标准化处理，按照四分位对城市联系度进行分类。参照王芳等[30]动态分析城市结构的方式，对黄河流域各流域城市生态韧性空间结构进行分析。

1.3.3　多尺度地理加权回归（MGWR）模型　产业活动是造成地区生态压力的显著要素[31]，产业结构升级是产业活动中极为重要的组成部分，对生态韧性的稳定和提升存在重要影响。为分析产业结构对不同城市网络的作用效果，基于产业高级化（X_1）和产业合理化（X_2）以及交互作用（X_1×X_2）的视角[32]，采用MGWR模型对产业结构的空间影响进行探究。产业结构高级化反映生产过程中各部门在产值、人力资源、国民收入比例的变动过程[33]。而产业结构合理化反映了产业结构优化过程中对于资源、环境的良性循环水平[34]。产业结构高级化采取付凌晖[35]构建由三次产业增加值比重形成三维向量的方式，根据向量夹角法[36]进行测算高级化水平。产业结构合理化采取吕明元等[37]的测算方法，使用各产业权重结构偏离度的加权来反映产业结构合理化指标。

现有研究成果表明[38-39]，技术创新对于产业发展和生态保护具有重要意义。因此，选择技术创新作为控制变量，采用政府科学技术财政支出占比和地方绿色技术专利授权量用于表示地方政府对科

技创新的支持程度以及城市绿色技术创新的产出能力，相关数据来源于各省、市统计年鉴以及中国研究数据服务平台(CNRDS)。

相比于传统的地理加权回归(GWR)模型，MGWR模型改进了GWR模型建模过程在同一空间尺度上运行的假设[40]，可用于探索局部变量之间的地理变化关系。本文采用MGWR模型分析不同变量对城市生态韧性的作用，具体模型如下：

$$\mathrm{UER}_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^{n} \beta_{\mathrm{bw}k}(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \tag{6}$$

式中：UER_i 为第 i 个城市的城市生态韧性；k 为样本数；x_{ik} 为第 i 个城市的第 k 个解释变量；$\beta_{\mathrm{bw}k}(u_i, v_i)$ 为在带宽bw$k$下第 i 个格网中第 k 个变量的回归系数[41]；(u_i, v_i) 为第 i 个城市的质心坐标；$\beta_0(u_i, v_i)$ 为第 i 个格网的截距项；ε_i 为随机误差项。

2 结果与分析

2.1 黄河流域生态韧性评价

通过MatlabR2022b运行CRITIC-TOPSIS模型得到黄河流域2012—2021年63个城市生态韧性水平，并对黄河流域生态韧性水平进行可视化(图3)。

黄河上游地区涨幅较明显的地区集中在上游南部地区，年平均涨幅均在0.70%以上，其中临夏市、平凉市涨幅高于1.5%。内蒙古乌兰察布市、巴彦淖尔市城市生态韧性水平稍有下降，年平均降幅分别为0.48%、0.32%(图3a)。根据变化趋势，上游城市生态韧性波动较为明显，一方面是上游地区更容易受到火灾、旱灾、地震等不确定自然灾害的影响。2012—2021年，上游年平均自然灾害频率为20

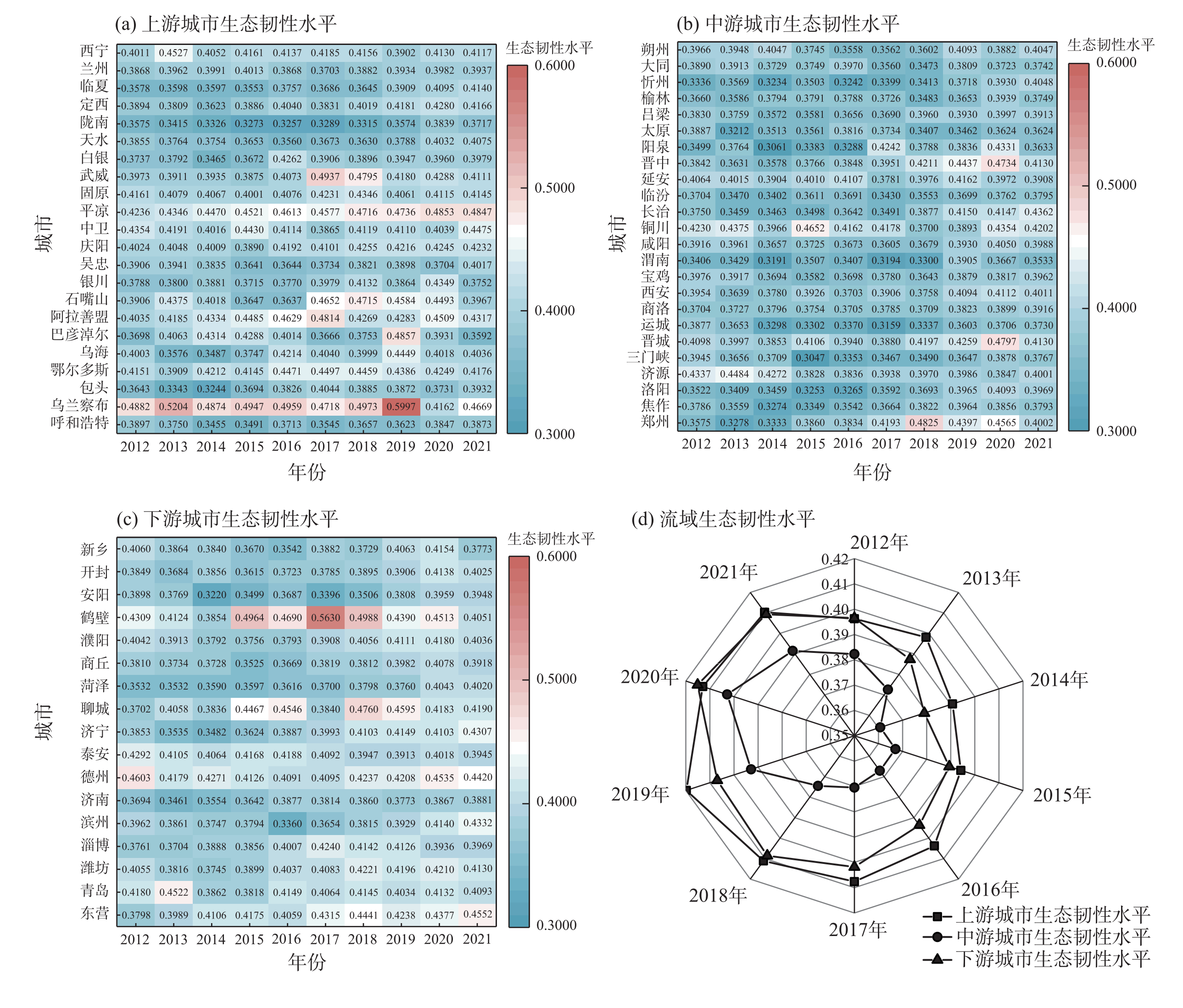


图3 黄河流域城市生态韧性水平

Fig. 3 Urban ecological resilience levels in the Yellow River Basin

次，分别是中、下游的1.64和3.39倍。不同于人为城市灾害的恢复，自然灾害的修复周期更长，外部依赖性更大，对于城市的资源调配能力要求更高。另一方面，城市工业资源综合利用效率在2012—2021年波动明显，部分城市年际变化幅度在30%以上，同时，不同年份地区财政在环境保护的投入力度的大幅度变化也是造成城市生态韧性出现明显波动的重要原因之一。

中游地区的城市生态韧性均值由2012年的0.3823降至2021年的0.3788，大致经历“降低-升高-降低”的演化过程，下降的主要区域集中在山西省太原市、大同市、临汾市，陕西省延安市以及河南济源市、三门峡市等地，年平均降幅在0.42%~0.86%之间（图3b）。城市生态韧性上涨较明显的为长治市和忻州市，年平均上涨幅度为1.81%和2.37%。相比于黄河上游，中游城市主要以资源型、工业型居多，城市生态韧性稳定和发展较为困难。

下游地区整体上平均变化程度较小（图3c）。就城市而言，2012年黄河下游城市生态韧性高值区主要集中在河南省鹤壁市以及山东省泰安市、德州市、青岛市等城市，但下降幅度较为明显，尤其是鹤壁市和泰安市的年平均降幅分别为0.67%、0.90%。除上述城市，黄河流域下游的大多数城市表现为上涨趋势，相比于中、上游，下游17个地级市中，1/3以上的城市平均涨幅在1%以上，整体趋势良好。

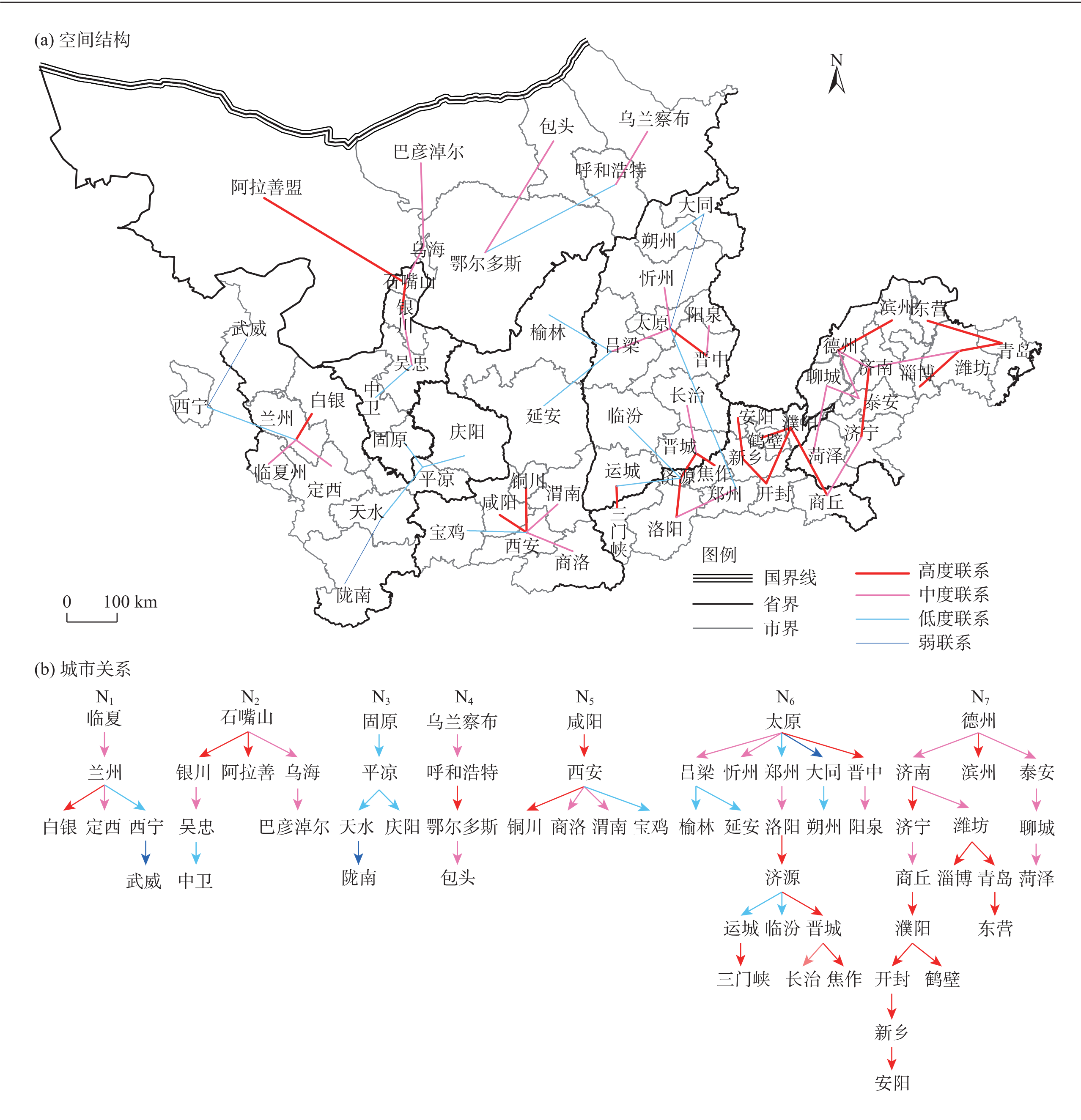
根据黄河流域上、中、下游地区城市生态韧性变化过程（图3d），黄河流域各区域城市生态韧性之间存在“上游>下游>中游”的相对关系。相比于中、下游地区，上游地区工业设施密集程度较低，同时新能源行业发展形势较好。上游虽然具有较高的生态脆弱性，但人类活动相对较少，由此生态韧性优于中、下游地区。在变化程度上，黄河上、中、下游的年平均涨幅分别为0.41%、0.30%、0.40%。黄河流域城市生态韧性总体在0.5以下，韧性程度较低。一方面黄河流域本身的生态环境较为脆弱；同时，作为能源、农业等劳动密集型产业分布较广的地区，在地区前期建设开发过程中对生态的重视程度较低[42]。另一方面，地区经济发展差异较大，地区之间的发展模式较为粗放，资源利用程度较低，尤其是从事煤矿、金属矿产为主的部分地区的污染较为严重。

2.2 黄河流域城市生态韧性网络结构

采用引力模型，测算各地级市之间的联系度，并对其进行标准化处理。通过运用动态分析的方式，得到黄河流域各流域的网络结构（图4），并通过ArcGIS进行可视化处理。

根据研究结果，上游主要形成了4个城市网络（N_1~N_4），N_1主要由西宁市以及甘肃省中西部城市组成。在城市发展过程中，白银市作为兰白经济圈的副中心[43]，是中国重要有色金属工业建设地区，产业结构中重工业占有较大比例，城市现代服务业基础设施建设相对匮乏。兰州市拥有较多的科研机构和高校资源，具有良好的科技创新基础，但与之相配套的交通资源较少。西宁市在能源方面，尤其是在光伏和风力发电等新能源产业发展具有良好的自然条件，能源利用能力不断改善，为城市经济和生态环境发展奠定基础。N_2主要以银川市、吴忠市、石嘴山市、阿拉善盟为主。银川市主要是以能源产业作为主要支柱产业。近几年来，银川市加快产业转型，以新材料、新能源作为主要方向，同时致力于加强与邻域城市的协作化发展，共同创造黄河上游高质量生态经济带。N_3由固原市、天水市等城市组成，城市网络内部联系主要是低层次连接。甘肃省工业以及城市服务资源大多集中于兰州市、天水市，其余城市的要素禀赋较差，从而导致城市生态韧性发展受限。N_4城市网络包括呼和浩特市、鄂尔多斯市、乌兰察布市和包头市，上述城市占据内蒙古经济总量的60%以上，同时城市科技创新资源、基础设施联通程度和生态环境协同治理方面具有高度的一致性。呼和浩特市和乌兰察布市均是以能源、材料等产业作为城市发展的主要方向，尤其是在新能源开发利用方面，致力于风电、光伏建设，能源方面的转型升级有助于提升城市生态韧性，能源结构的相似性也有利于城市间的相互影响。

中游主要形成2个城市网络（N_5~N_6）。N_5主要由西安市、咸阳市以及铜川市等城市组成，西安市主要以电子制造业、能源、材料等作为主要发展模式。近10 a来，西安市和咸阳市致力于推动“西咸一体化”，但咸阳市城市基础设施水平较低，现代服务业建设能力有待提高。铜川市在发展过程中对于煤炭资源的依赖性较高，人居环境易遭受破坏。N_6主要由太原市、晋中市、忻州市以及郑州市、洛阳市等城市组成。近几年来，太原市、晋中市在能源服



注：N_1~N_7表示城市网络分组。

图4 黄河流域城市生态韧性网络结构

Fig. 4 Network structure of ecological resilience of cities in the Yellow River Basin

务、科技创新以及城市基础设施建设等方面积极合作，建设以推动太原市为主、晋中市为辅的产业链、供应链，为改进地区资源结构，促进城市生态韧性发展建立基础。豫西以及晋南部分城市大致呈现“郑洛济晋”链式区域联系空间格局。郑州市和洛阳市作为河南省的中心和副中心城市，在产业结构和要素交流方面具有一定的经济基础。晋城市与济源市、焦作市在生态资源方面具有较高的相似性，相互之间的交流合作，对于城市生态韧性的稳固和提升具有积极作用。三门峡市和运城市近年来在黄河流域保护，水利设施建设以及产业要素互惠、基础设施共建等方面加深合作，为2市的转型升级提供合作基础。

下游地区形成一个城市网络(N_7)，其内部可分为豫北-鲁西、鲁中-鲁东2个子网络。豫北-鲁西城市网络主要节点为济南市、濮阳市、开封市，其中开封市作为豫东与豫中、豫北交界城市，在要素交流中充分发挥中介作用。商丘市、濮阳市主要以现代

化农业为主，在生态韧性网络中主要表现为向外资源输出，与山东省菏泽市、聊城市等进行资源、产业交流合作。鲁中-鲁东城市网络主要联系包括潍坊-青岛-淄博、滨州-德州交互链。青岛市、淄博市、潍坊市地缘相近，同属于胶东经济圈，在《胶东经济圈“十四五”一体化发展规划》中提出要打造优势互补、协同互助产业带。潍坊市和淄博市在生态环境、经济发展资源禀赋方面具有较强的互补性。作为传统工业城市，淄博市在产业转型升级需要借助外部资源优势，从而促进城市生态韧性的提升。

黄河流域城市生态韧性网络结构自上而下联系程度以及流域集中程度逐渐升高。相比于中下游，上游各城市之间地域分布较为分散，受地域环境影响，城市开发程度较低，城市联系多为组团式空间结构，规模较小。中游地区主要形成以“西安市-咸阳市”和太原市为主的城市网络，前者近年来致力于高新技术产业布局，而后者大多从事与能源及相关服务业，产业布局差异明显。由于下游经济发展整体上优于中、上游地区，工业以及制造业产业链相对完善，并且分布较广，城市之间产业联系程度较高，易于创造有利于生态环境协同改善的产业条件，因此下游的城市关联度整体上要高于中、上游地区。

2.3 影响因素

采取以下模型（模型1~模型3），通过MGWR2.2软件对产业结构对不同城市网络城市生态韧性的影响进行MGWR回归，根据检验参数，MGWR模型的残差标准误（Sigma estimate）、最大似然估计（Log-likelihood）绝对值以及赤池信息量准则（AIC）、校正赤池信息量准则（AICc）以及贝叶斯信息准则（BIC）参数值均小于GWR模型，且MGWR模型决定系数（R^2）以及校正决定系数（Adj. R^2）均大于GWR模型，说明MGWR模型的性能更优，因此选择MGWR模型回归结果（表2）进行分析。

$$\text{模型1：} \mathrm{UER}_i = \beta_0 + \beta_{\mathrm{bw1}} X_1 + \sum_{k=1}^{m} \beta_{\mathrm{bw}k} \mathrm{Control}_{ik} + \varepsilon_i \quad (7)$$

$$\text{模型2：} \mathrm{UER}_i = \beta_0 + \beta_{\mathrm{bw2}} X_2 + \sum_{k=1}^{m} \beta_{\mathrm{bw}k} \mathrm{Control}_{ik} + \varepsilon_i \quad (8)$$

$$\text{模型3：} \mathrm{UER}_i = \beta_0 + \beta_{\mathrm{bw1}} X_1 + \beta_{\mathrm{bw2}} X_2 + \beta_{\mathrm{bw3}} X_1 \times X_2 + \sum_{k=1}^{m} \beta_{\mathrm{bw}k} \mathrm{Control}_{ik} + \varepsilon_i \quad (9)$$

根据回归结果（表3），产业高级化（X_1）、产业合理化（X_2）对城市生态韧性具有正向直接影响（模型1、模型2）。但X_2对N_4不显著。对于黄河流域整体而言，X_1的直接影响均大于X_2，表明在现有发展条件下，产业的优化转型升级对于生态韧性的直接改善作用更优。X_1、X_2对于中下游地区的直接改善作用大于上游，主要在于黄河流域中下游地区的经济发展程度、产业转型基础以及资源集聚水平相对较高，具有良好要素配置协调能力，能够在一定资源约束条件下减轻对生态环境的破坏，有助于生态韧性的稳定。

为进一步分析X_1和X_2对城市生态韧性的作用，构建模型3检验二者之间是否存在调节效应。结果显示$X_1 \times X_2$不存在显著性，但在考虑X_1与$X_1 \times X_2$影响情况下，X_2对城市生态韧性的影响作用增强且均具有显著性。即X_2对X_1表现出替代效应[44]。

结合模型1、模型2，对于N_1~N_3而言，X_1对城市生态韧性直接改善作用更为显著，主要在于N_1、N_2、N_3产业结构中整体上由中低端产业占主导地位，虽然近年来新能源产业发展良好，但产业结构单一且具有较高的环境依赖性，高技术产业和现代服务业相对缺乏。现有条件下的产业转型升级能够更大

表2　模型检验参数

Tab. 2　Model testing parameters

检验参数	模型1		模型2		模型3	
	GWR	MGWR	GWR	MGWR	GWR	MGWR
残差标准误（Sigma estimate）	0.678	0.661	0.77	0.756	0.592	0.573
最大似然估计（Log-likelihood）	−66.818	−65.060	−75.859	−74.818	−54.843	−53.514
赤池信息量准则（AIC）	155.259	151.827	172.839	169.984	139.678	133.964
校正赤池信息量准则（AICc）	159.649	156.252	177.018	173.849	148.562	140.981
贝叶斯信息准则（BIC）	179.571	176.231	196.585	192.860	173.397	164.246
决定系数（R^2）	0.605	0.624	0.489	0.504	0.719	0.730
校正决定系数（Adj. R^2）	0.539	0.562	0.406	0.427	0.648	0.670

注：GWR为地理加权回归；MGWR为多尺度地理加权回归。

表3 MGWR模型回归结果

Tab. 3 MGWR model regression results

城市网络	模型1		模型2		模型3			
	Coff_X_1	R^2	Coff_X_2	R^2	Coff_X_1	Coff_X_2	Coff_X_1×X_2	R^2
N_1	0.4213***	0.5040	0.2864**	0.2734	−0.0465	0.4305*	−0.2640	0.6079
	(3.6453)		(−2.2599)		(−0.4107)	(−1.7313)	(−0.1196)	
N_2	0.4210***	0.5787	0.3010**	0.4222	−0.0921	0.4799*	−0.2049	0.6916
	(3.7700)		(−2.3833)		(−0.8228)	(−1.9695)	(−0.0929)	
N_3	0.5085***	0.4664	0.2403*	0.2076	0.1051	0.4924**	−0.3048	0.5579
	(4.3572)		(−1.9777)		−0.9493	(−2.0408)	(−0.1380)	
N_4	0.8883***	0.6393	0.1142	0.5321	0.1544	0.9697***	0.0076	0.7692
	(6.2403)		(−0.6300)		−1.2428	(−4.6244)	−0.0034	
N_5	0.6221***	0.5925	0.5801***	0.5457	−0.1233	0.8483***	0.3150	0.7608
	(4.6876)		(−2.7459)		(−0.9382)	(−3.9456)	−0.1403	
N_6	0.4263***	0.5539	0.3667***	0.4599	−0.1791	0.5669**	−0.0859	0.7085
	(3.3686)		(−2.9261)		(−1.4340)	(−2.3460)	(−0.0389)	
N_7	0.5679***	0.6319	0.4975**	0.5536	−0.1293	0.8128***	0.2121	0.7418
	(4.3848)		(−2.4187)		(−1.0116)	(−3.8533)	−0.0946	
控制变量	是		是		是			

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%水平上显著;括号中数值表示t值;Coff表示变量回归系数。

程度地改善地区发展条件,减少环境依赖,提升区域城市生态韧性。对于N_4城市网络,虽然X_2在改善区域城市生态韧性的过程中,对X_1表现出替代效应。但N_4产业体系以新材料、化工以及农畜产品加工为主,高新产业和现代服务业发展较为滞缓,对于产业转型升级的需求较大,同时由于N_4区域规模较小,对于资源的容纳以及配置能力相对较低。在现有条件下,产业转型对于提升区域资源利用能力以及对生态的改善作用更优。对于N_5~N_7,X_2同样表现出替代效应。N_5、N_6中大多城市以能源行业为主,而能源行业转型升级相对困难,在现有产业发展结构下优化资源结构,采用新技术提升现有资源利用能力能够更大程度地改善城市生态韧性。N_7作为黄河流域发展较好的区域,产业结构相对完善,但存在资源环境约束趋紧、城市发展相对不均衡问题。因此,提升产业资源有效转移和利用,不仅能够减弱城市差距,同时有助于缓解环境问题,提升城市生态韧性。

3 讨 论

通过建立"压力-状态-反应"指标体系,测算黄河流域城市生态韧性总体在0.5以下,韧性程度较低,各区域城市生态韧性之间存在"上游>下游>中游"的相对关系。有相关学者[45]从"状态-响应-创新"视角分析城市生态韧性。对比研究结果,各流域城市生态韧性的相对关系基本保持一致,但由于分析视角的不同,生态韧性水平上存在一定差异,但也从不同角度证实了黄河流域生态韧性较低的客观事实。

对于黄河流域城市网络,大多是基于经济发展[46-47]角度分析城市关联,虽有基于生态角度[48]分析城市关联关系,但角度较单一。黄河流域能源优势明显,但能源综合利用率较低,生态问题突出。生态水平不仅取决于单一主体的内部要素,区域联系也是决定生态水平的关键。依据《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中的相关指示,综合考虑地区生态条件,评价城市生态韧性,分析城市之间的空间联系和区域结构。由于分析生态空间结构的研究较少,对比碳排放、经济等[47-48]相关研究,黄河流域大致形成以兰州市、西安市、太原市、郑州市、济南市、青岛市为主,白银市、咸阳市、洛阳市等城市为辅的多中心结构。同时,根据"十四五"城市群发展战略,研究结果中的城市分布与城市群规划基本保持一致,能够为黄河流域区域绿色发展和环境协同治理提供理论依据。

影响因素分析结果表明,产业结构转型和高效

的资源配置均有助于提升城市生态韧性。并且在产业-生态发展关系中,产业资源配置能够对产业转型产生替代效应。对于黄河流域上游而言,大量城市仍以低产能产业为主,优势行业较少,无法发挥对于产业资源的配置能力,因此产业升级对于地区生态的改善作用更大。对于中、下游地区而言,在考虑产业升级的情况下优化资源配置能够更大程度地促进城市生态韧性。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 黄河流域生态韧性总体在0.5左右波动,韧性程度较低。黄河流域生态韧性在空间上表现为"上游>下游>中游"的相对关系,在变化幅度上,黄河上、中、下游的年平均涨幅分别为0.41%、0.30%、0.40%,与空间关系保持一致。

(2) 2012—2021年黄河流域63个城市网络结构保持稳定大致可分为7个主要城市网络。其中,上游城市的城市网络空间较分散,城市联系程度较低,中、下游城市联系度依次增强,流域联系密集程度不断升高。

(3) 根据影响因素分析,产业结构高级化对不同城市网络的生态韧性均具有正向影响作用,产业结构合理化的直接作用稍弱,但存在对高级化的替代效应。对于中、下游,在进行产业升级的过程中,重点结构合理化,提升资源配置效率,更有助于生态韧性的稳定和提升。

4.2 建议

根据上述分析,黄河流域城市生态韧性主要存在以下问题:(1) 生态韧性水平较低,根据内部要素分析,主要问题是资源的综合利用程度较低且不稳定;(2) 社会网络结构虽然稳定,但城际之间的联系整体较弱,城市协同发展程度较低;(3) 未能充分发挥产业结构优化对生态韧性的改善作用。基于以上问题,提出以下建议:

(1) 丰富工业产业链,加强现代服务业建设,提升资源利用率。黄河上游城市的工业产业结构布局较为缺乏,工业资源的循环利用程度不足,资源利用效率较低。提高工业产业链多样性,并在此基础上加强信息服务业、现代物流业建设等现代服务业的建设,拓宽资源流通渠道。有助于增加资源利用程度,降低资源浪费,减轻环境压力,为提升生态韧性建立良好产业基础。

(2) 加强城际基础设施共建共享。黄河中游城市之间城市经济发展程度离散程度较高,城市基础设施、资源禀赋差异较大,加强城市间基础设施共建共享能力建设,对于消除地区资源差异、优化资源配置,具有较好的辅助作用,如以西安市-咸阳市、太原市-晋中市、郑州市-洛阳市为中心的经济辐射圈,在促进经济发展的同时扩大对周边基础设施建设投入、拓宽城市共享渠道,从而增强城际交流效率和要素互通、减少资源浪费、提升生态韧性。

(3) 强化创新驱动能力,加快城市之间资源互通,优化产业布局。黄河流域下游城市的各产业涉及行业类别较为丰富,但各个行业之间的相互联系程度较低,优化创新投入、提升创新能力,有助于加快传统行业转型升级、加快行业融合以及产业之间的交流,从而优化产业结构、提高城市资源利用率、提升城市生态韧性。

参考文献(References)

[1] 赵领娣, 孙兆旭. 海岸带城市经济发展质量与生态韧性协同发展演化及空间收敛特征[J]. 经济地理, 2023, 43(7): 119-129, 240. [Zhao Lingdi, Sun Zhaoxu. Evolution of coordinated development between economic development quality and ecological resilience in coastal cities and its spatial convergence features[J]. Economic Geography, 2023, 43(7): 119-129, 240.]

[2] 吕添贵, 胡晗, 付舒斐, 等. 长三角地区城市生态韧性时空分异特征及影响因素[J]. 地域研究与开发, 2023, 42(1): 54-60. [Lü Tiangui, Hu Han, Fu Shufei, et al. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of urban ecological resilience in the Yangtze River Delta[J]. Areal Research and Development, 2023, 42(1): 54-60.

[3] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 116-126. [Xia Chuyu, Dong Zhaoyingzi, Chen Bin. Spatio-temporal analysis and simulation of urban ecological resilience: A case study of Hangzhou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 116-126.]

[4] 陈强强, 杨凌. 近30 a黄河流域人地系统研究: 脉络、热点及展望[J].干旱区地理, 2023, 46(10): 1692-1703. [Chen Qiangqiang, Yang Ling. Studies of the human-land system in the Yellow River Basin for 30 years: Context, hotspots and prospects[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(10): 1692-1703.]

[5] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. 经济地理, 2022, 42(8): 51-61. [Wang Songmao, Niu Jinlan. Dynamic evolution and obstacle factors of urban

ecological resilience in Shandong Peninsula urban agglomeration [J]. Economic Geography, 2022, 42(8): 51-61.]

[6] 于法稳, 方兰. 黄河流域生态保护和高质量发展的若干问题[J]. 中国软科学, 2020(6): 85-95. [Yu Fawen, Fang Lan. Issues regarding the ecological protection and high-quality development of Yellow River Basin[J]. China Soft Science, 2020(6): 85-95.]

[7] 安树伟, 李瑞鹏. 黄河流域高质量发展的内涵与推进方略[J]. 改革, 2020(1): 76-86. [An Shuwei, Li Ruipeng. Intension and promotion strategy of high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Reform, 2020(1): 76-86.]

[8] 李连刚, 张平宇, 谭俊涛, 等. 韧性概念演变与区域经济韧性研究进展[J]. 人文地理, 2019, 34(2): 1-7, 151. [Li Liangang, Zhang Pingyu, Tan Juntao, et al. Review on the evolution of resilience concept and research progress on regional economic resilience[J]. Human Geography, 2019, 34(2): 1-7, 151.]

[9] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1973, 4(1): 1-23.

[10] Zeng X, Yu Y C, Yang S, et al. Urban resilience for urban sustainability: Concepts, dimensions, and perspectives[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 2481, doi: 10.3390/su14052481.

[11] Folke C, Carpenter S R, Walker B, et al. Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability[J]. Ecology and Society, 2010, 15(4): 20, doi: 10.5751/ES-03610-150420.

[12] Esteve V, Roser M, Martí R, et al. Reviewing social-ecological resilience for agroforestry systems under climate change conditions [J]. Science of the Total Environment, 2023, 869: 161763, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161763.

[13] 陶洁怡, 董平, 陆玉麒. 长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1975-1987. [Tao Jieyi, Dong Ping, Lu Yuqi. Spatial-temporal analysis and influencing factors of ecological resilience in Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(9): 1975-1987.]

[14] 张明斗, 任衍婷. 环境规制对生态韧性的影响——基于"本地—邻地"效应的视角[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(6): 16-29. [Zhang Mingdou, Ren Yanting. Impact of environmental regulation on ecological resilience: A perspective of "local-neighborhood" effect[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2022, 24(6): 16-29.]

[15] 周成, 赵亚玲, 张旭红, 等. 黄河流域城市生态韧性与效率时空演化特征及协调发展分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1514-1523. [Zhou Cheng, Zhao Yaling, Zhang Xuhong, et al. Spatiotemporal evolutionary characteristics and coordinated development of urban ecological resilience and efficiency in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1514-1523.]

[16] 周文慧, 钞小静. 黄河流域数字基础设施、经济发展韧性与生态环境保护的耦合协调发展分析——基于三元系统耦合协调模型[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(9): 1-9. [Zhou Wenhui, Chao Xiaojing. Coupling coordinated development of digital infrastructure, economic resilience and environmental protection in the Yellow River Basin: An approach of ternary system coupling coordination model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(9): 1-9.]

[17] 孙宇, 刘维忠, 盛洋. 基于PSR模型的新疆水资源经济生态韧性时空差异及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(12): 2017-2028. [Sun Yu, Liu Weizhong, Sheng Yang. Spatiotemporal differences and influencing factors of economic and ecological resilience of water resources in Xinjiang based on the PSR model[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(12): 2017-2028.]

[18] 牛建广, 辛伯雄, 王明琪. 城市生态效率与生态韧性的协调发展评价与障碍因子识别[J]. 统计与决策, 2024, 40(4): 79-84. [Niu Jianguang, Xin Boxiong, Wang Mingqi. Coordinated development evaluation and obstacle factors identification of urban eco-efficiency and ecological resilience[J]. Statistics & Decision, 2024, 40(4): 79-84.]

[19] Li G Z, Wang L Q. Study of regional variations and convergence in ecological resilience of Chinese cities[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110667, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110667.

[20] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.

[21] 迟国泰, 芦丹, 孙秀峰. 基于城市差异系数的城市商业银行效率评价模型及实证研究[J]. 管理工程学报, 2007(3): 29-34, 55. [Chi Guotai, Lu Dan, Sun Xiufeng. The efficiency evaluation of China commercial bank based on city difference coefficient[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2007(3): 29-34, 55.]

[22] 杨兰桥, 王元亮. 中国城市群运行效率的综合评价[J]. 统计与决策, 2021, 37(1): 69-72. [Yang Lanqiao, Wang Yuanliang. Comprehensive evaluation of operational efficiency of Chinese urban agglomerations[J]. Statistics & Decision, 2021, 37(1): 69-72.]

[23] 魏敏, 李书昊. 新时代中国经济高质量发展水平的测度研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(11): 3-20. [Wei Min, Li Shuhao. Study on the measurement of economic high-quality development level in China in the new era[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2018, 35(11): 3-20.]

[24] 么泽恩, 蔡海生, 张学玲, 等. 基于CRITIC-TOPSIS模型的浮梁县土地生态安全时空分异及其障碍因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(10): 2452-2463. [Yao Ze'en, Cai Haisheng, Zhang Xueling, et al. Spatio-temporal differentiation and obstacle factors of land ecological security in Fuliang County based on CRITIC-TOPSIS model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(10): 2452-2463.]

[25] 马述忠, 任婉婉, 吴国杰. 一国农产品贸易网络特征及其对全球价值链分工的影响——基于社会网络分析视角[J]. 管理世界, 2016(3): 60-72. [Ma Shuzhong, Ren Wanwan, Wu Guojie. Characteristics of a country's agricultural trade network and its impact on the division of labor in global value chains: Based on the social

network analysis perspective[J]. Journal of Management World, 2016(3): 60-72.]

[26] 罗来军, 罗雨泽, 刘畅, 等. 基于引力模型重新推导的双边国际贸易检验[J]. 世界经济, 2014, 37(12): 67-94. [Luo Laijun, Luo Yuzhe, Liu Chang, et al. Test of bilateral international trade based on re-derivation of gravity modeling[J]. The Journal of World Economy, 2014, 37(12): 67-94.]

[27] 林春艳, 孔凡超. 中国产业结构高度化的空间关联效应分析——基于社会网络分析方法[J]. 经济学家, 2016(11): 45-53. [Lin Chunyan, Kong Fanchao. Analysis on the spatial correlation effect of industrial structure supererogation in China: Based on social network analysis[J]. Economist, 2016(11): 45-53.]

[28] 朱海燕, 童彦, 高庆彦. 我国商贸流通业碳排放的空间网络结构特征研究[J]. 商业经济研究, 2021(6): 5-9. [Zhu Haiyan, Tong Yan, Gao Qingyan. Research on the spatial network structure characteristics of carbon emission in China's trade and circulation industry[J]. Journal of Commercial Economics, 2021(6): 5-9.]

[29] 邱志萍, 刘举胜, 何建佳. 我国商贸流通网络的结构特征及驱动因素——基于引力模型的社会网络分析[J]. 中国流通经济, 2023, 37(2): 31-42. [Qiu Zhiping, Liu Jusheng, He Jianjia. Structural characteristics and driving factors of the commercial circulation network in China: The social network analysis based on gravity model[J]. China Business and Market, 2023, 37(2): 31-42.]

[30] 王芳, 郭梦瑶, 牛方曲. "动-静"结合视角下都市圈多层次空间格局研究——以黄河"几"字弯都市圈为例[J]. 地理科学进展, 2023, 42(7): 1243-1255. [Wang Fang, Guo Mengyao, Niu Fangqu. Hierarchical spatial pattern of urban agglomeration based on the dynamic and static data: A case study of the Yellow River Ji-shaped bend[J]. Progress in Geography, 2023, 42(7): 1243-1255.]

[31] 杨勇, 邓祥征. 中国城市生态效率时空演变及影响因素的区域差异[J]. 地理科学, 2019, 39(7): 1111-1118. [Yang Yong, Deng Xiangzheng. The spatio-temporal evolutionary characteristics and regional differences in affecting factors analysis of China's urban eco-efficiency[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(7): 1111-1118.]

[32] 张人中, 马威, 马欣怡. 促进产业结构优化的双向投资机制设计研究[J]. 世界经济研究, 2022(6): 18-34, 135. [Zhang Renzhong, Ma Wei, Ma Xinyi. Design of two-way investment mechanism to promote the optimal of industrial structure[J]. World Economy Studies, 2022(6): 18-34, 135.]

[33] 滕瑜, 李天祥, 于之倩. 中国就业变化的因素与潜力分析[J]. 中国软科学, 2016(7): 33-42. [Teng Yu, Li Tianxiang, Yu Zhiqian. Factors and potential analysis of employment changes in China[J]. China Soft Science, 2016(7): 33-42.]

[34] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. 经济研究, 2011, 46(5): 4-16, 31. [Gan Chunhui, Zheng Ruogu, Yu Dianfan. An empirical study on the effects of industrial structure on economic growth and fluctuations in China[J]. Economic Research Journal, 2011, 46(5): 4-16, 31.]

[35] 付凌晖. 我国产业结构高级化与经济增长关系的实证研究[J]. 统计研究, 2010, 27(8): 79-81. [Fu Linghui. An empirical research on industry structure and economic growth[J]. Statistical Research, 2010, 27(8): 79-81.]

[36] 钟坚, 王锋波. 粤港澳大湾区产业结构优化升级的实证研究——基于准自然实验分析法[J]. 经济问题探索, 2022(11): 143-161. [Zhong Jian, Wang Fengbo. An empirical study on the optimization and upgrading of industrial structure in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area: Based on quasi-natural experimental analysis method[J]. Inquiry into Economic Issues, 2022(11): 143-161.]

[37] 吕明元, 尤萌萌. 韩国产业结构变迁对经济增长方式转型的影响——基于能耗碳排放的实证分析[J]. 世界经济研究, 2013(7): 73-80, 89. [Lü Mingyuan, You Mengmeng. The effects of industrial structure changing on transformation of the economic growth mode in South Korea: An empirical study based on the perspective of energy consumption and carbon emission[J]. World Economy Studies, 2013(7): 73-80, 89.]

[38] 代新玲, 刘伟. 产业数字化、技术创新与城市经济韧性[J]. 中国流通经济, 2022, 36(12): 81-91. [Dai Xinling, Liu Wei. Industrial digitalization, technological innovation and urban economic resilience[J]. China Business and Market, 2022, 36(12): 81-91.]

[39] Sunday T A, Sami U, Tevfik M K, et al. Endorsing sustainable development in BRICS: The role of technological innovation, renewable energy consumption, and natural resources in limiting carbon emission[J]. Science of the Total Environment, 2023, 859(P1): 160181, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160181.

[40] Wu B, Yan J B, Lin H. A cost-effective algorithm for calibrating multiscale geographically weighted regression models[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2022, 36(5): 898-917.

[41] 黄沣爵, 汤俊卿, 林华丽, 等. 基于多尺度地理加权回归模型的城市建成环境对共享单车空间分布影响研究[J]. 地理研究, 2023, 42(9): 2405-2418. [Huang Fengjue, Tang Junqing, Lin Huali, et al. Built environment effects on the spatio-temporal distribution of shared bikes based on multi-scale geographic weighted regression[J]. Geographical Research, 2023, 42(9): 2405-2418.]

[42] 茹少峰, 马茹慧. 黄河流域生态环境脆弱性评价、空间分析及预测[J]. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1722-1734. [Ru Shaofeng, Ma Ruhui. Evaluation, spatial analysis and prediction of ecological environment vulnerability of Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(7): 1722-1734.]

[43] 王海飞. 兰白都市经济圈视角下的白银市可持续发展战略[J]. 经济地理, 2011, 31(4): 566-572. [Wang Haifei. Research on sustainable development strategy of Baiyin City in view of Lanzhou-Baiyin metropolitan area[J]. Economic Geography, 2011, 31(4): 566-572.]

[44] 肖红军, 阳镇, 刘美玉. 企业数字化的社会责任促进效应：内外双重路径的检验[J].经济管理, 2021, 43(11): 52-69. [Xiao Hongjun, Yang Zhen, Liu Meiyu. The promotion effect of corporate digi-

talization on corporate social responsibility: A test of internal and external dual paths[J]. Business and Management Journal, 2021, 43(11): 52–69.]

[45] 王松茂, 宁文萍, 牛金兰, 等. 黄河流域城市生态韧性时空分异及收敛研究——基于七大城市群61个城市的实证分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(1): 93–103. [Wang Songmao, Ning Wenping, Niu Jinlan, et al. Spatiotemporal differentiation and convergence of urban ecological resilience in the Yellow River Basin: An empirical analysis based on 61 cities in seven major urban agglomerations[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(1): 93–103.]

[46] 赵林, 高晓彤, 吴殿廷. 黄河流域绿色技术创新空间关联网络结构与影响因素[J]. 人文地理, 2023, 38(4): 102–111. [Zhao Lin, Gao Xiaotong, Wu Dianting. Spatial correlation network and influencing factors of green technology innovation in Yellow River Basin[J]. Human Geography, 2023, 38(4): 102–111.]

[47] 赵金丽, 张学波, 任嘉敏, 等. 多元流视角下黄河流域城市网络空间结构及其影响因素[J]. 地理科学, 2022, 42(10): 1778–1787. [Zhao Jinli, Zhang Xuebo, Ren Jiamin, et al. Spatial structure and influencing factors of urban network in the Yellow River Basin based on multiple flows[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(10): 1778–1787.]

[48] 邓光耀, 周颖钦. 黄河流域雾霾污染空间关联网络结构特征及驱动因素[J]. 统计与决策, 2024, 40(3): 96–100. [Deng Guangyao, Zhou Yingqin. Structural characteristics and driving factors of haze pollution spatial correlation network in the Yellow River Basin[J]. Statistics & Decision, 2024, 40(3): 96–100.]

Urban ecological resilience, social networks and its influencing factors in the Yellow River Basin

ZHANG Aoxiang[1], MIAO Chenglin[1,2], CHEN Zhengyan[2]

(1. School of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;
2. School of Business Administration, Shandong Technology and Business University, Yantai 264005, Shandong, China)

Abstract: The social network of urban ecological resilience and its influencing factors were analyzed to promote regional green synergistic development. Data from 2012 to 2021 for 63 prefecture-level cities in the Yellow River Basin, China, were used to construct a pressure-state-response model. The CRITIC-TOPSIS method, gravity model, and multi-scale geographic weighting model were applied to examine the ecological resilience of cities in the Yellow River Basin, the linkage relationships, and the influencing factors. The results reveal the following: (1) The ecological resilience of the Yellow River Basin fluctuates around 0.5, with the pattern "upstream>downstream>midstream", and the average annual increase rates of each river reach was 0.41%, 0.30%, and 0.40%, respectively. (2) The Yellow River Basin is divided into seven major city networks (N_1–N_7). The degree of basin agglomeration and city association increases sequentially from the upper to the lower reaches. (3) Considering the influence of direct effect, regulatory effect and substitution effect, industrial structure upgrades significantly enhance the urban ecological resilience of city networks N_1–N_4, with impact coefficients of 0.4213, 0.4210, 0.5085, and 0.8883, respectively. In contrast, industrial structure rationalization more effectively enhances the ecological resilience of city networks N_5–N_7, with impact coefficients of 0.8483, 0.5669, and 0.8128.

Key words: ecological resilience; spatial structure; CRITIC-TOPSIS; multi-scale geographical weighted regression; Yellow River Basin